



中詰め二重管方式による回転貫入鋼管杭の力学特性に関する研究

著者	永井 宏, 池田 篤則
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	27
ページ	48-51
発行年	2017-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009759

中詰め二重管方式による回転貫入鋼管杭の 力学特性に関する研究

永井 宏^{*1}, 池田 篤則^{*2}

1 はじめに

回転貫入杭は、鋼管の先端部に取り付けられた羽根により、通常のストレート杭よりも大きな鉛直支持力が期待できる。しかし、実際の設計において地表面付近の地盤が非常に軟弱な場合、水平力に対する検討で杭の仕様が決定され、鉛直支持力を有効に利用できない場合もある。そこで、軟弱地盤における回転貫入杭の耐震性能の向上を図るため、杭上部を二重管方式(回転貫入杭本体、外殻鋼管、中詰めコンクリートで構成)で拡大径化し、地震時の水平抵抗力を大幅に増強する杭工法の開発を目指している。

本研究では、二重鋼管の構造試験(圧縮、曲げ)および数値解析を実施して、二重鋼管の基本性能を把握すると共に、二重鋼管の力学特性や本体鋼管に取り付けたコンクリートとのずれ止めの効果を検討した。

2 構造試験

2.1 試験概要

図1に試験体と載荷装置の関係を示す。H鋼による剛な載荷枠を構築し、中詰めコンクリート二重鋼管の拡頭端を載荷枠に剛結して、自由端側から載荷することにより、杭頭での載荷を模擬した。

試験体は、杭体に相当する本体鋼管、外殻鋼管、円環板および中詰めコンクリートで構成される。試験体の諸元とコンクリートの基本物性を試験種別と併せて表1に示す。試験体の長さは軟弱地盤中の小径鋼管杭

を想定し、全長 3,500mm、二重鋼管の長さ 3,000mm とした。試験体 Nb, Mb では本体鋼管とコンクリート間のずれ止めを目的として、リング状に加工した丸鋼 ϕ 13mm を鋼管内部に 300mm 間隔で溶接した。なお、円環板と本体鋼管の間には約 1mm の隙間を設けている。

計測項目は、載荷荷重、変位、二重鋼管各部のひずみである。ひずみは本体鋼管、外殻鋼管およびコンクリートにて二重鋼管の固定端 ($z=0$) から 300mm 間隔を基本に計 11 断面で計測した。変位は、載荷点を含めて載荷点側からほぼ等間隔の計 8 断面で、圧縮試験時は軸方向、曲げ試験時は軸直角方向を測定した。

載荷は油圧ジャッキで静的に負荷した。圧縮試験では 100kN ピッチで 5 段階 6 サイクルの 1 方向多サイクル方式で杭体部の短期許容荷重を上回る 3,000kN を負荷、曲げ試験では 30kN ピッチで 1 段階 10 サイクルの正負交番多サイクル方式で固定端 ($z=0$) での曲げモーメントが本体・外殻鋼管の全塑性モーメントの単純和に相当する荷重を十分上回る 300kN を負荷した。なお、曲げ試験の載荷点は自由端から 100mm の位置である。

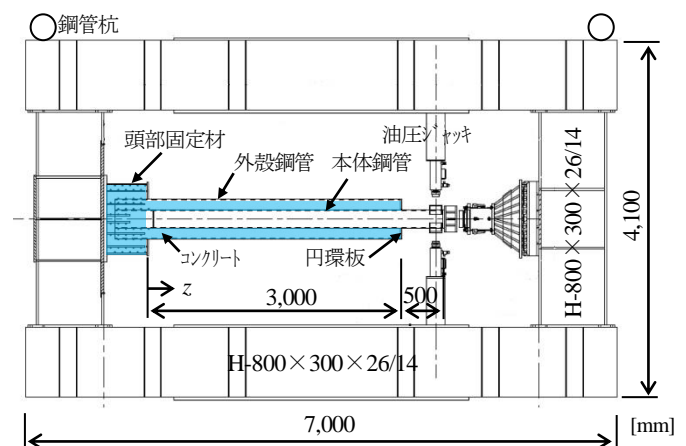


図1 試験体および載荷装置 (曲げ試験時)

*1: 室蘭工業大学 暮らし環境系領域

*2: 千代田工営株式会社

表 1 試験体の諸元およびコンクリートの基本物性

試験体	試験種別	ずれ止め	本体鋼管			外殻鋼管			円環板			コンクリート				
			材質	外径	板厚	材質	外径	板厚	材質	外径	板厚	Fc (N/mm ²)	養生日数	圧縮強度 f_c	引張強度 f_t	静弾性係数 (N/mm ²)
				(mm)			(mm)			(mm)				(N/mm ²)	(N/mm ²)	
Na	圧縮	無し	STK490	216.3	12.7	STK400	457.2	6.4	SS400	外径	16	27	15	31.9	3.2	---
Nb		有り								φ457.2				38.8	3.7	
Ma	無し	内径								35.0				4.3		
Mb	曲げ	有り								φ218.0				35.3	2.9	29500

2.2 試験結果および考察

2.2.1 圧縮試験

図 2 は軸方向変位であり、二重鋼管の固定端 ($z=0$) での変位を 0 としたときの相対変位を示している。なお、 $z=3.0\text{m}$ では本体、外殻鋼管の両者で変位を計測しているためプロットが重なっている。荷重点 ($z=3.5\text{m}$) での Na, Nb の変位は同程度であるが、外殻鋼管の $z=2.0 \sim 2.5\text{m}$ では、大荷重時に Nb の変位が大きい。これは、ずれ止めの支圧効果により、外殻鋼管へ伝わる応力が大きくなったためと考えられる。また、Nb の $z=3.0\text{m}$ における変位が小さくなっているが、円環板が荷重に伴って回転したためと推察される。

3,000kN 時での各構成材の軸力分布を図 3 に示す。ここで、本体と外殻鋼管の軸力はひずみ計測値から求め、コンクリートの軸力は荷重荷重から本体と外殻鋼管の軸力を差し引いた残余分としている。ずれ止めの無い Na では本体鋼管の軸力が荷重点側から軸方向に直線的に減少するのに対し、Nb では $z=0 \sim 2.0\text{m}$ 間で各構成材の負担荷重がほぼ一定となっているのが分かる。本体鋼管からの軸方向の荷重伝達は、ずれ止めの影響が顕著で効果的である。

2.2.2 曲げ試験

二重鋼管の端部 ($z=3.0\text{m}$) と中央部 ($z=1.5\text{m}$) における荷重－変位関係を図 4 に示す。Ma, Mb とともに正負加力の差は小さく、200kN 付近から剛性は低下している。ずれ止めの有無に着目すると、Mb は Ma よりも変位が小さい。

各荷重階における本体と外殻鋼管の軸方向のひずみ分布を図 5 に示す。本体鋼管では、Ma, Mb とともに圧縮側よりも引張側の値が大きい。引張側のコンクリートにはひび割れが生じ、中立軸が徐々に圧縮側に移動するためと考えられる。外殻鋼管は、荷重増加につれ圧縮側のひずみも大きくなる傾向が見えるが、ずれ止めの影響は顕著ではない。

固定端近傍 $z=0.3\text{m}$ での外殻鋼管のひずみ（正方向荷重時）から求めた $M-\phi$ 関係を図 6 に示す。両試験体とも中詰めコンクリートの効果が窺えるが、ずれ止めを有する Mb の方が変形性能はやや優れる。

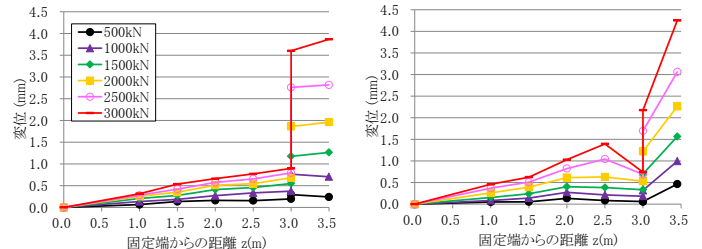


図 2 軸方向変位 (左 : Na, 右 : Nb)

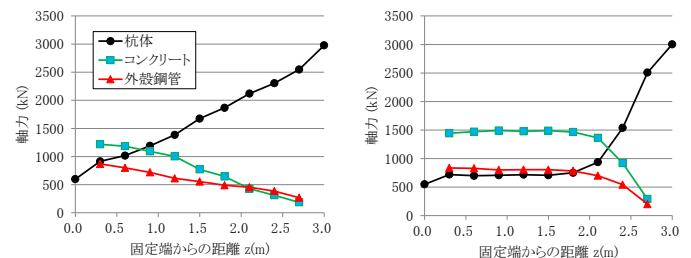


図 3 軸力分布 (左 : Na, 右 : Nb)

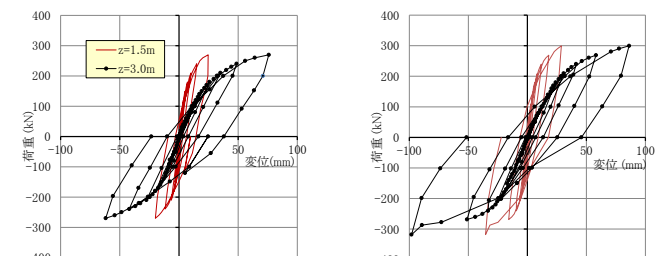


図 4 荷重－変位関係 (左 : Ma, 右 : Mb)

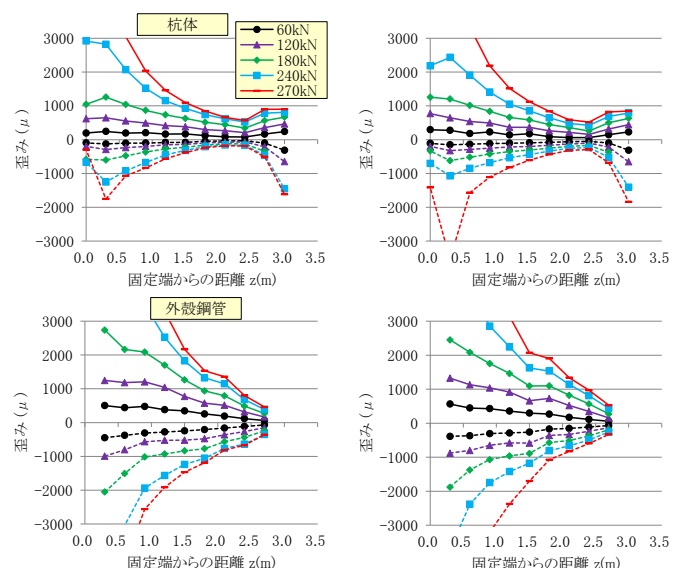


図 5 軸方向のひずみ分布 (左 : Ma, 右 : Mb)

3 数値解析

前節の曲げ試験を対象とした FEM 解析を行った。

3.1 解析方法

FEM には汎用解析ソフト *Soil Plus* を用いて静的非線形解析を行った。図 7 に FEM 解析モデルを示す。解析では杭頭固定材より上方を対象とし、全体の 1/2 領域 (Z-X 面を対称面) をモデル化した。本体鋼管、外殻鋼管およびコンクリートにはソリッド要素を用いて 16 角形断面に置換した。本体および外殻の鋼管とコンクリート間にはすべりを考慮する面ジョイント要素を導入し、Mb のずれ止めは支圧抵抗を考慮するためソリッド要素で表現 (図 7(b)) した。各材料の構成則として、鋼管は Von Mises, コンクリートは D-min 法を適用した (図 7(c), (d))。また、鋼管とコンクリートの境界は、別途実施した長さ 0.3m の二重鋼管の押し抜き付着強度試験の結果を基にクーロン摩擦でモデル化 (図 7(e)) した。水平荷重 H は試験と同一位置 $z=3.4\text{m}$ で X 方向に単調漸増させた。

3.2 解析結果および考察

以後の図中では実験値を Exp, 解析値を Ana と表す。

3.2.1 荷重試験と FEM 解析との比較

図 8 は水平荷重 H —水平変位 δ の比較であり、二重管の端部 ($z=3\text{m}$) と中央部 ($z=1.5\text{m}$) の結果を示す。Ma, Mb とともに解析値は実験値との差が 20% 程度であり、二重鋼管の曲げ変形特性を概ね表現できている。

図 9 は $H=100, 200, 250\text{kN}$ での固定端近傍 ($z=0.3\text{m}$) における断面内の軸方向ひずみ分布 (本体鋼管, コンクリート, 外殻鋼管) である。加力背面側 (引張) のコンクリートを除くと、解析値は Mb では実験値と近似しており、二重鋼管は平面保持がされているのが分かる。図示していないが、 $z=0.6\sim 2.4\text{m}$ の範囲でも解析値は実験値に対応し、同傾向であった。一方、Ma では加力前面で本体鋼管とコンクリートのひずみが同程度 (不連続) となる状況が十分に表現できていない。荷重の増加に伴い解析値は鋼管ひずみを過小評価しており、引張側でその差が大きい。

3.2.2 ずれ止め鉄筋の有無が二重鋼管に及ぼす影響

図 10 に二重管下部の加力前面、背面の最外縁での鋼管—コンクリート境界面における材軸方向の相対変位 (外殻鋼管に対するコンクリートの変位を S_o-C , コンクリートに対する本体鋼管の変位を $C-S_i$ と略記) を示す。ずれ止めがない Ma では加力前面の $C-S_i$ が大きい。実験ではこれよりも大きな相対変位が生じ、加力前面の $C-S_i$ でひずみの不連続 (図 8) が生じたと推察される。

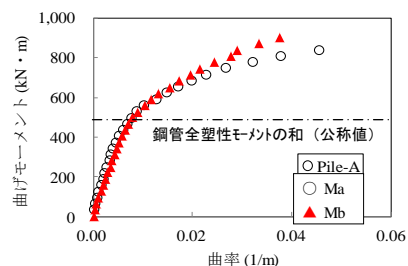


図 6 $M-\phi$ 関係 ($z=0.3\text{m}$)

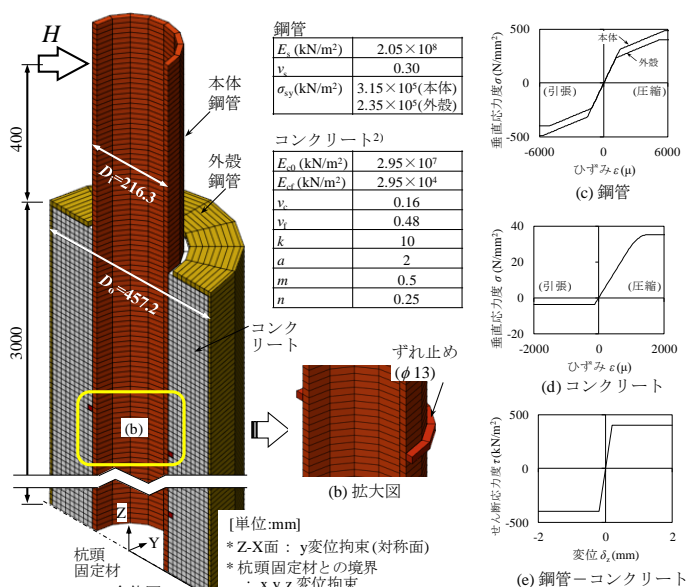


図 7 FEM 解析モデル (Mb)

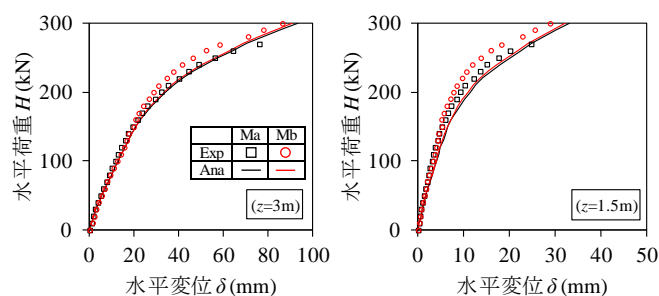


図 8 水平荷重—水平変位

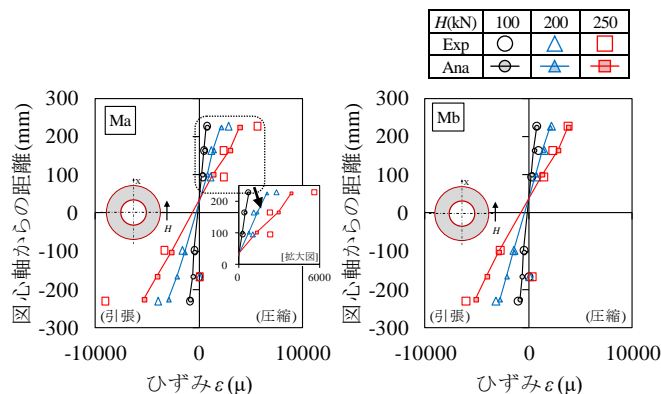


図 9 断面内のひずみ分布 ($z=0.3\text{m}$)

3.2.3 中詰め二重鋼管の $M-\phi$ 関係

図11に二重管下部での曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係を、図12に M と中立軸比 x_0/D_0 ($D_0=457.2\text{mm}$)の関係を示す。ここで、 M は式(1)～式(3)にて算出し、 ϕ や中立軸位置(二重管断面の図心軸からの距離) x_0 は断面内のひずみ分布(ただし、実験値では引張側のコンクリートを除く)を直線近似して算出した。

$$M_{Exp} = H \cdot L \quad (1)$$

$$M_{Ana} = M_{si} + M_c + M_{so} \quad (2)$$

$$M_{\chi} = \int_A \sigma_{\chi,i} \cdot x_{\chi,i} \cdot dA_{\chi,i} \quad (\chi = si, c, so) \quad (3)$$

M_{si} , M_c , M_{so} : 本体鋼管(si), コンクリート(c)および外殻鋼管(so)が負担する曲げモーメント, σ_i : 要素 i の Z 方向垂直応力度, x_i : 要素 i の図心から図心軸までの垂直距離, dA_i : 要素 i の断面積, L : 載荷点からの距離($=3.1\text{m}$)

$M-\phi$ 関係をみると、解析では $M \approx 400\text{kNm}$ で非線形性を示しているが、これは外殻鋼管の降伏に起因している。また、本体鋼管とコンクリート間のすべりの抑制を反映して、MbはMaよりも曲率の増分が小さい。一方、中立軸はコンクリートの引張降伏に伴い圧縮側に移動するが、中立軸比 x_0/D_0 はMa, Mbともに大きな差異はなく $M=200\text{kNm}$ 以降は $x_0/D_0=0.06 \sim 0.09$ であり、中立軸の位置は本体鋼管の内側に留まっている。

4 おわりに

中詰めコンクリートは、二重鋼管で拘束されることにより杭体の曲げ変形性能の向上に寄与する。ずれ止めの効果は圧縮特性に対しては顕著に高く各構成材の負担荷重が一定となり、また曲げ変形特性に対しては曲げ剛性の低下が緩和されることが確認できた。

今後、ずれ止めの取付け位置の最適化や二重鋼管の $M-\phi$ 関係のモデル化の検討、更に実地盤での施工や原位置での水平載荷試験による検討へと展開していく。

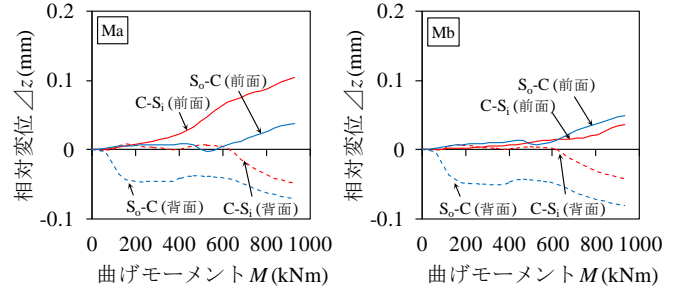


図10 鋼管—コンクリートの相対変位 ($z=0.3\text{m}$)

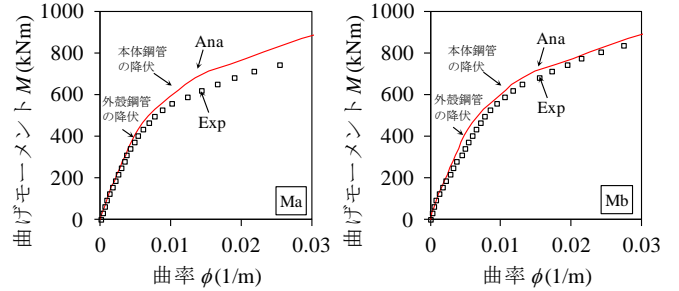


図11 $M-\phi$ 関係 ($z=0.3\text{m}$)

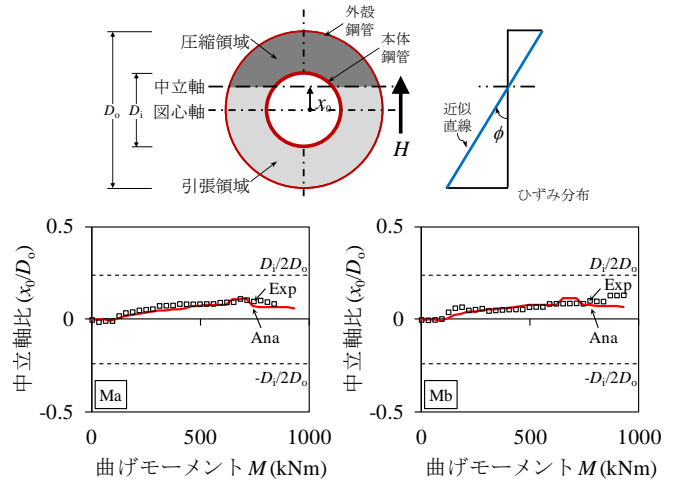


図12 $M-x_0/D_0$ 関係 ($z=0.3\text{m}$)